

## Válasz Dr. Jankovics István opponensi véleményére

Először is megköszönöm az opponens körültekintő és gyors munkáját. Az alábbiakban a feltett kérdései dőlt betűkkel, a válaszaim alattuk, álló betűkkel szerepelnek. Ahol a kérdés több részből állt, a válaszok egyértelműbb követhetősége érdekében a, ill. b betűket szúrtam be.

1. *Van-e olyan, a jelölt által vizsgált (felfedezett) jelenség az RR Lyrae csillagoknál, ami más pulzáló változócsillag típusnál is megjelenik. Ha igen, miként segítheti ez az eltérő tömegű és fejlődési állapotban lévő csillagok megismerését?*

A fénygörbék azonos periódusú szimultán amplitúdó- és fázismodulációját, az ún. Blazskó-effektust, sokáig az RR Lyrae csillagok sajátosságának tekintették. Az irodalomban egyesek különböző pulzáló változócsillagok detektált amplitúdóváltozásánál felvetették, hogy ott valójában Blazskó-effektusról lehet szó (pl. Berger, 1990, Breger és tsai, 2004 –  $\delta$  Scuti csillagoknál; Henry és tsai, 2004 –  $\gamma$  Dor csillagoknál). Michael Breger egészen odáig ment (Breger, 2010), hogy felvetette: nevezzenek Blazskó-effektusnak minden periodikus, vagy kváziperiodikus amplitúdóváltozást, amit pulzáló változócsillagok mutatnak a pulzáló fehér törpék ilyen viselkedésétől a cefeidákéig. Ezt a kiterjesztést azonban a szakma nem igazán fogadta el. A mért amplitúdóváltozások sok esetben a jelen lévő nemradiális módusok csatolódásával, vagy közeli frekvenciák okozta lebegéssel jól magyarázhatók, míg a hasonló magyarázatok a radiálisan pulzáló RR Lyrae-k esetében nem bizonyultak megfelelőnek. Az RR Lyrae-k esetében mindig meglévő fázismodulációi sem volt mindig megfigyelhető.

Vannak azonban olyan csillagtípusok is, ahol az analógia igen erős. Ilyen például a szintén radiálisan pulzáló cefeidák csoportja. Ennek egy tagjáról a V473 Lyr-ről – több évtizedes földi észlelés összegyűjtésével és analizálásával (Molnár és Szabados, 2014) – sikerült kimutatni, hogy amplitúdó- és fázisváltozása *mindenben megfelel a Blazskó-effektusnak*. Később a hasonlóság még teljesebbé vált, amikor MOST űrtávcső adatainak felhasználásával felfedezték (Molnár és tsai, 2017), hogy a csillag *modulációja több periódusú*, hasonlóan az általam a dolgozat 7. fejezetében vizsgált Kepler RR Lyrae-minta csillagaihoz, sőt a sok RR Lyrae csillagban megjelenő perióduskettőződés jelenségét is sikerült megtalálni.

A *Kepler* űrtávcső eredeti látómezejében egyetlen cefeida található, a V1154 Cyg. E csillagról is kiderült, hogy kis amplitúdójú modulációja van (Derekas és tsai, 2017). Könnyen lehet, hogy a moduláció a cefeidák körében jóval gyakoribb, mint azt korábban gondoltuk. A *Kepler* cefeida érdekessége, hogy a *fénygörbéje erős fáziszajt mutat* (Derekas és tsai, 2012). Hasonló jelenséget aztán egy CoRoT RR Lyrae csillagnál (CM Ori) nekem is sikerült kimutatnom (5.4. fejezet).

Az egyes változócsillag-típusokban megjelenő jelenségek pontos megismerése, leírása abban segít, hogy más csillagtípusokban is tudjuk mit keressünk, és el tudjuk dönteni azonos jelenséggel van-e dolgunk vagy sem. Amennyiben pedig találunk azonosnak mutatkozó jelenségeket, akkor azonos fizikai magyarázatot tudunk adni rájuk. A Blazskó-effektus esetében például komolyan felmerült (Molnár és tsai, 2017), hogy sikerülhet megalkotni egy egységes Blazskó-magyarázatot mind az RR Lyrae-kre, mind pedig a cefeidákra, ami a fő radiális pulzációs módus és egy magas fokszerű radiális módus (az ún. strange módus) rezonanciája épül. Az RR Lyrae-k és cefeidák között persze lenne különbség a gerjesztett módusok tényleges fokszáma és a rezonancia arányszámában, de a lényegben nem.

Egy másik ígéretes csoportja a csillagoknak, amelyeknél az RR Lyrae-knél megfigyelt jelenségeket kereshetünk, a nagy amplitúdójú  $\delta$  Scutik (High Amplitude Delta Scuti Stars, HADS), amelyek domináns módon szintén radiálisan pulzálnak. A viszonylag ritka típusból űrfotometria módszerekkel mindössze két csillagot vizsgáltak eddig. A CoRoT 10155310 csillag domináns (radiális) módusán Poretti és tsai (2011) a Blazskó-effektushoz nagyon hasonló amplitúdóváltozást mutattak ki, míg a Kepler-mező egyetlen ilyen csillaga (V2367 Cyg, Balona és tsai, 2012) nem mutat ilyesmit. HADS csillagokból valószínűleg jó néhány van a K2 mezőkön, illetve a TESS és a Plato űrtávcsövek anyagában is bizonyára sok ilyen csillagról kapunk majd adatot.

Az ilyen analógiák nemcsak az elméletet segíthetik (l. a cefeidák Blazskó-effektusát), hanem praktikus előnyei is lehetnek. Ha tudjuk, hogy azonos jelenséget vizsgálunk, akkor az észlelést is jobban tervezhetjük pl. a cefeidák megfigyelése sok esetben könnyebb (hosszabb periódus, nagyobb abszolút fényesség), vagy máskor a HADS csillagok rövid periódusa előny, hiszen rövidebb észlelési idősből kapunk olyan eredményt, mint az RR Lyrae-kre vagy a cefeidákra csak jóval hosszabból.

2. (a) *Magyarázhatók-e az RR Lyrae csillagok Fourier-spektrumában megjelenő nagy számú extra frekvencia az analízishez használt matematikai eszközök okozta hamis csúcsokkal (lásd. pl. Balona, MNRAS, 439, 3453, 2014)?* (b) *Hogyan döntötte el a jelölt, hogy egy adott frekvenciacsúcs még szignifikáns-e, hogy valódi, a csillagban megjelenő periodicitásról van szó?*

Az (a) kérdésre a rövid válaszem az, hogy nem. Az ok többes (1) a Blazskó RR Lyrae-k Fourier-spektrumában látható több száz frekvencia nem független, valójában a túlnyomó többségük néhány (2-5) független frekvencia harmonikusa, ill. lineáris kombinációja. A néhány ténylegesen független frekvencia – a pulzáció, a moduláció(k) frekvenciái, és esetenként néhány 1-3 kis amplitúdójú módus frekvenciája –, egyértelműen meghatározhatók már a nyers („fehérítetlen”) spektrumokból is. (2) Ide kapcsolódik, hogy a Balona (2014) cikkben mutatott hamis csúcsok csak sokszori (több százszor elvégzett) egymás utáni fehérítés során keletkeznek. A spektrumokon én jellemzően néhány (1-3) fehérítési lépést tettem, részben a kérdésben jelzett probléma elkerülésért. (3) A kis amplitúdójú frekvenciák helyes beazonosítását általában több különböző adatsoron is ellenőriztem (pl. a fénygörbék spektruma mellett felhasználtam az O-C diagramok spektrumait is), és csak akkor tekintettem egy ilyen frekvenciát valósnak, ha minden vizsgált adatsorban megtaláltam.

(b) Egy véges hosszúságú, valahogyan mintavételezett, zajos idősor Fourier-spektrumában található csúcsok valódiságának eldöntése nem egzaktul megoldható feladat. Jellemzően két, a gyakorlatban sokat próbált módszert használtam: (1) Breger és tsai (1993) félempirikus módon definiálták egy frekvenciacsúcs jel-zaj viszonyát ( $S/N$ ) a spektrumon belül. Vizsgálataik szerint ha  $S/N > 4$ , a csúcs jó eséllyel valós jelhez tartozik. (2) Reegen 2007-ben egzakt módon definiálta a spektrális szignifikanciát ( $\sigma_p$ ), amely szintén jellemzi egy frekvencia valódiságát. Reegen még azt is megmutatta, hogy a korábbi  $S/N$  és a spektrális szignifikancia nem független egymástól:  $S/N = 4 = \sigma_p \approx 5.5$ . Ezeknek megfelelően az  $S/N > 4$ , ill.  $\sigma_p > 5$  volt a minimumfeltétel, amikor egy adott frekvenciát megvizsgáltam. Ha egyéb indok (pl. lineáris kombináció volta, O-C-ben megléte) is mutatott a realitására, akkor elfogadtam valósnak, ha nem, akkor nem tekintettem valós jel frekvenciájának. Ugyanakkor a korábban említett független frekvenciák közül még a kis amplitúdójú módusok legerősebb frekvenciái is jellemzően 10-20 körüli jel-zaj viszonytal voltak detektálhatók.

3. a) *A dolgozatban a dominánsan alaplómódusban pulzáló R Rab típusú csillagokról és azok modulációjáról ír a jelölt. Mit lehet tudni az első felhangban pulzáló RRc (és esetleg a*

*kétmódusú, RRd) csillagok modulációjának gyakoriságáról, tulajdonságairól? b) Alkalmazta-e a dolgozat 8. pontjában tárgyalt formalizmust ezen csillagokra? Van-e hasonlóság, illetve különbség a matematikai leírás szempontjából a két típus között?*

a) Az eddigi összes munka szignifikáns különbséget talált az RRab csillagok és a felhangban (is) pulzáló RR Lyrae csillagok modulációjának gyakoriságában. A konkrét számszerű arányok függenek a Galaxisban elfoglalt helytől is (mező, gömbhalmaz, bulge), de az RRab-k esetén ez 50% körül van (Jurcsik és tsai, 2009; Prudil és Skarka 2016), míg az RRc-k esetén ez az arány lényegesen kisebb (5-10%, Moskalik és Poretti, 2003; Jurcsik és tsai, 2014). Nem világos, hogy a kisebb amplitúdójú RRc csillagokban csak nehezebben észrevehető a jelenség, tehát egy kiválasztási effektus-e az ok, vagy valós fizikai oka van a különbségnek.

Az RRd csillagok eleve ritkábbak, az összes RR Lyrae csillag 5-10%-a tartozik közéjük (Soszyński és tsai, 2016a), és ezek között a legutóbbi időkig nem is volt ismert modulált. A közelmúltban megváltozott a helyzet. Az OGLE team találta az első ilyen csillagot (Soszyński és tsai, 2014) a galaktikus bulge-ban, majd szintén ők már 15 Blazskó RRd csillagot analizáltak (Smolec és tsai, 2015). Jurcsik és tsai (2014, 2015) az M3 gömbhalmazban öt RRd csillag esetében is modulációt mutattak ki, amivel a halmaz RRd csillagaira is 50%-os modulációs arányt kaptak. Soszyński és tsai (2016b) pedig a Magellán Felhőkben találtak 22 olyan RRd csillagot, amelyek Blazskó-effektust mutatnak. Az összes eddig talált, modulált, kétmódusú RR Lyrae csillagra az alaplómódus és a felhang periódusaránya nagyon különbözik (majdnem mindig kisebb) a kanonikus  $P_0/P_1=0,742$  értéknél, azaz a Petersen-diagramon a „normális” kétmódusú csillagok pozíciója alá esnek. Továbbá ezekben a csillagokban az alaplómódus amplitúdója nagyobb, mint a felhangé, holott a kétmódusú csillagokban általában a felhang a domináns. Ezért is vetették fel Soszyński és tsai (2016b), hogy itt valójában egy új csoporttal van dolgunk, és ezért ők ezeket a kétmódusú csillagokat anomális RRd-knek nevezik. Ha ezt a megkülönböztetést elfogadjuk, akkor viszont nem marad ismert, nem anomális, Blazskó-effektust mutató RRd csillag.

Ami magának a modulációnak a tulajdonságait illeti nagyrészt hasonlóak az RRab csillagoknál látottakhoz, de van néhány érdekes különbség is. Az egyik ilyen – egyes Blazskó RRd csillagoknál megfigyelhető – jelenség, hogy az átlagfényesség és a domináns módus amplitúdója egymással ellentétesen változik (Smolec és tsai, 2015). Mind az RRc, mind az RRd csillagokra igaz, hogy sokkal gyorsabb és erősebb periódusváltozásokat mutatnak, mint az RRab csillagok. A modulációjuk pedig kevésbé tűnik regulárisnak, mint az RRab csillagoké. Egy további jelentős különbség a kis amplitúdójú módusok megjelenésében van: a felhangú Blazskó RR Lyrae csillagokban olyan kis amplitúdójú, minden bizonnyal nemradiális módusok frekvenciái is megjelennek, amelyek a nem modulált RRc és RRd csillagokban is mindig megfigyelhetők (Gruberbauer és tsai, 2007; Moskalik és tsai, 2015; Jurcsik és tsai, 2015; Soszyński és tsai, 2016b), de az RRab csillagokban soha.

b) A dolgozatban leírt eljárás minden további nélkül alkalmazható RRc, RRd vagy bármilyen más pulzáló változócsillag modulációjának leírására, sőt a moduláció fizikai oka sem érdekes. Például Hiromoto Sibahashi és Don Kurtz is hivatkozta munkámat, amikor a kettősség kiváltotta fázismodulációt vizsgálták multiperiodikus csillagokon (Sibahashi és Kurtz, 2012). Az egész leírás lényege nem is annyira a fénygörbék teljes (reziduálmentes) leírása. Erre nem is alkalmas, hanem pl. a Fourier-spektrumokban látott jelenségek (oldalcsúcsok eloszlása, azok amplitúdói, stb.) értelmezése, jelenséghez kötése. Magam nem alkalmaztam RRc és RRd csillagokra a leírást, de nem az alkalmatlansága miatt, hanem mert nem foglalkoztam ebben az időszakban ilyen csillagok adataival.

## Hivatkozások

- Balona, L. és tsai, 2012, MNRAS, 419, 3028  
Breger, M. 1990, A&A, 240, 308  
Breger, M. 2010, Variable Stars, the Galactic Halo and Galaxy Formation, (eds. Sterken, C., Samus', N. N., Szabados, L.), Sternberg Astronomical Institute of Moscow University, Russia, p. 95.  
Breger, M. és tsai, 1993, A&A, 271, 482  
Gruberbauer, M. és tsai, 2007, MNRAS, 379, 1498  
Henry, G. W., Fekel, F. C., Henry, S. M., 2005, AJ, 129, 2815  
Derekas, A. és tsai, 2012, MNRAS, 425, 1312  
Derekas, A. és tsai, 2017, MNRAS, 464, 1553  
Jurcsik, J. és tsai, 2009, MNRAS, 400, 1006  
Jurcsik, J. és tsai, 2014, ApJ, 797, L3  
Jurcsik, J. és tsai, 2015, ApJS, 219, 25  
Molnár, L. és Szabados, L., 2014, MNRAS, 442, 3222  
Molnár, L. és tsai, 2017, MNRAS, 466, 4009  
Moskalik, P. és Poretti, E., 2003, A&A, 398, 213  
Moskalik, P. és tsai, 2015, MNRAS, 447, 2348  
Poretti, E. és tsai, 2011, A&A, 528, A147  
Prudil, Z., Skarka, M., 2016, MNRAS, 466, 2602  
Reegen, P., 2007, A&A, 467, 1353  
Shibahashi, H. és Kurtz, D. W., 2012, MNRAS, 422, 738  
Smolec, R. és tsai, 2015, MNRAS, 447, 3756  
Soszyński, I. és tsai, 2014, Acta Astron. 64, 177  
Soszyński, I. és tsai, 2016a, Acta Astron., 66, 131  
Soszyński, I. és tsai, 2016b, MNRAS, 463, 1332

Budapest, 2018. április 3.

Benkő József sk.